

Les Avalanches en Ingénierie

Christophe ANCEY

1. INTRODUCTION

Durant le dernier siècle, les Alpes ont connu un essor considérable sous l'effet du développement industriel (industries lourdes de transformation, décolletage, hydroélectricité), de l'accroissement des activités de loisir, de la densification de la population dans les zones d'altitude (stations de ski), et de l'intensification des échanges et transports de marchandises. En France, jusqu'à une époque récente (1970), ce développement économique s'est réalisé sans véritable prise de conscience des contraintes spécifiques imposées par le milieu naturel, notamment les risques associés tels que les avalanches. L'année 1970 est une année charnière. La catastrophe de Val-d'Isère en février 1970 (39 personnes tuées par une avalanche dans un chalet), puis celle d'Assy en avril (71 morts dans un sanatorium dans une coulée de boue et de neige) ont entraîné un changement radical de comportement, en premier lieu institutionnel avec la création de plusieurs organismes consacrés à l'étude de la neige et des avalanches, puis social avec une réglementation de plus en plus contraignante en matière d'aménagement. Même si la lutte contre les avalanches date de plusieurs siècles en Europe (par exemple l'étrave paravalanche de l'église de Vallorcine date du XVIII^e s.), le développement d'une science dévolue à l'étude de la neige et des avalanches (la nivologie) et sa mise en pratique par les ingénieurs datent des années 1970 à peine. Science relativement jeune, la nivologie a considérablement évolué depuis ces trois dernières décennies. Le présent chapitre fait un état des lieux des connaissances actuelles sur le phénomène physique « avalanche ». On parlera ici volontiers de phénomène ou d'événement (avalancheux) pour désigner et caractériser ce processus physique. Il s'agit principalement de distinguer le phénomène physique de la représentation qu'on s'en fait dès lors qu'on parle de risque d'avalanche (cette

représentation sera désignée sous le terme d'aléa par la suite). Après cette entrée en matière, nous évoquerons les grandes classes de problèmes qui se pose en ingénierie, puis nous aborderons les outils de calcul aujourd'hui utilisables en ingénierie pour décrire un écoulement avalancheux. Après cette description des méthodes de calcul, nous présenterons une vue synthétique sur les techniques de protection paravalanche les plus couramment utilisées en France en indiquant leurs principales caractéristiques. Volontairement nous limiterons ici au risque d'avalanche, mais il faut garder à l'esprit que la neige peut exercer d'autres nuisances, notamment en termes de viabilité hivernale (congère, diminution de la visibilité) et des effets de surcharge (effondrement de toitures). Dans un dernier paragraphe, nous esquisserons un tableau général sur ce qu'est l'expertise du risque d'avalanche. L'accent sera plus particulièrement mis sur la décomposition du travail de l'expert dans son analyse.

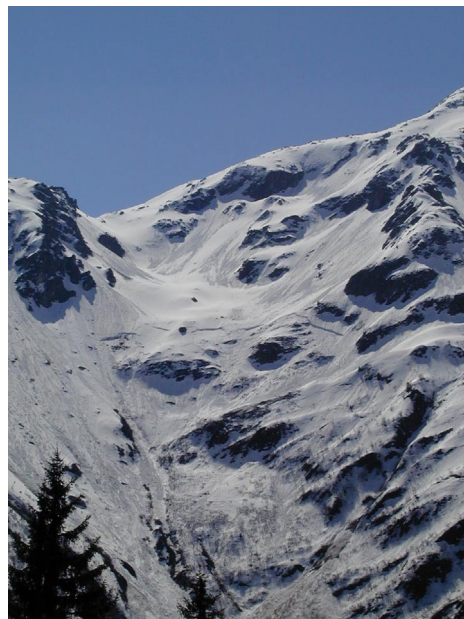
2. PHYSIQUE DES ECOULEMENTS

Une avalanche est un écoulement gravitaire rapide de neige le long d'une pente de montagne. Par cette définition un peu longue et lourde, nous avons essayé de qualifier l'écoulement avalancheux et de le distinguer d'autres phénomènes. Ainsi, le transport de neige par le vent est également un écoulement de neige, mais il n'est pas induit par la gravité mais par le vent. Le mouvement lent du manteau neigeux, appelée aussi *reptation*, composé d'un fluage interne et d'un glissement le long du sol est également un écoulement de neige, mais de cinétique très lente ; les vitesses se mesurent en effet en mm/j. De même la rupture d'un paquet de neige sur un toit ou le long d'un talus ne peut être qualifiée d'avalanche. Nous abordons ci-après le déclenchement et le mouvement d'une avalanche.

2.1. Déclenchement des avalanches

Les différentes chutes de neige au cours de l'hiver et du printemps s'accumulent et forment ce qu'on appelle le manteau neigeux. Sous l'effet de processus mécaniques (tassement, reptation) et thermodynamiques (transferts de masse au sein des couches),

la neige composant le manteau neigeux évolue au fil de la saison en fonction principalement des conditions nivo-météorologiques (précipitations, soleil, vent, etc.) [1]. Ses propriétés mécaniques (cohésion, résistance au cisaillement, etc.) évoluent également considérablement. Du fait de la stratification en couches de neige successives, le manteau neigeux a une structure hétérogène similaire à un mille-feuilles. Cette structuration est plutôt favorable à des mouvements relatifs entre couches induits par la gravité, qui peuvent parfois conduire à une rupture de quelques strates et ainsi à la formation d'une avalanche. Ce mode de départ naturel est très courant et s'observe facilement sur le terrain, car la rupture laisse apparaître une ligne de cassure très nette et un plan de glissement (cf. photographie n° 1). D'autres formes de départ et d'autres causes de départ que la gravité sont également possibles. Par exemple, une surcharge même faible, comme un skieur, peut suffire à ébranler un manteau neigeux et entraîner sa rupture.



Photographie 1. Départ en plaque de neige humide au printemps.

Plusieurs facteurs influent sur la stabilité d'un manteau neigeux. On peut distinguer les facteurs fixes (liés au site) et les facteurs variables (généralement inhérents aux

conditions météorologiques) [1]. Parmi les facteurs fixes, c'est principalement le relief qui a une influence sur la stabilité d'un manteau neigeux, mais d'autres facteurs comme le couvert végétal y contribuent également. Concernant le relief, deux facteurs principaux sont l'inclinaison et l'orientation par rapport au soleil. Comme la gravité est le principal moteur tant dans le déclenchement que dans l'écoulement, l'influence de la pente est prépondérante. On observe que les départs d'avalanche interviennent généralement dans des pentes supérieures à 25° environ ; à de rares occasions, notamment dans le cas de neige gorgée d'eau, des départs sur des pentes plus faibles sont possibles. Au-dessus de 50° , les pentes ont beaucoup plus de mal à stocker des quantités de neige importantes. Le rôle de l'orientation est plus délicat à cerner. En moyenne, quelle que soit son exposition au soleil, un versant peut être avalancheux, mais si on se place à un instant donné, on observe en général que l'activité avalancheuse affecte plutôt un type de versant. Par exemple, l'après midi au printemps, la neige sur les versants ensoleillés s'humidifie fortement et perd de sa cohésion ; le risque d'avalanche y croît alors de manière significative. Parmi les facteurs variables, il est manifeste que les facteurs météorologiques jouent un rôle prépondérant dans l'activité avalancheuse. Dans un grand nombre de cas, une avalanche est consécutive à des chutes de neige récentes. Généralement, plus le cumul de neige est élevé, plus le risque de départ d'avalanche est grand et plus les avalanches déclenchées peuvent mobiliser un gros volume. L'intensité des chutes de neige est également un facteur important. Si l'intensité fluctue beaucoup au cours d'un épisode, une partie de la neige tombée a le temps de se tasser et de se consolider. Inversement, si la neige tombe fort et régulièrement, la couche de neige récente met plus de temps à se consolider. La pluie a un rôle complexe en termes de stabilité. En humidifiant le manteau neigeux, la pluie amène à un tassement plus rapide du manteau neigeux et à une modification de la neige (augmentation de la cohésion par création de ponts capillaires entre grains, réchauffement, modification de la forme des grains). Si la quantité d'eau liquide apportée est faible (teneur en eau liquide volumique inférieure à 0,5 %), la pluie ne modifie que faiblement les propriétés mécaniques de la neige. En revanche, dès que la teneur en eau devient plus forte ($>0,5\%$), la résistance au cisaillement d'une neige initialement sèche chute fortement, entraînant ainsi la

formation de nombreuses avalanches. Comme la pluie, le vent a une influence complexe sur la neige. Le vent a deux rôles : il peut transporter la neige durant et après une chute de neige et jouer ainsi sur le bilan local de masse de neige (en favorisant la formation d'accumulations ou bien en érodant des versants). Il modifie aussi les propriétés de la neige de surface. Par exemple, en transportant la neige, le vent favorise l'émoussement des grains et leur compactage une fois déposés. L'influence du vent sur la stabilité est en conséquence très complexe : elle peut être en positive soit en érodant la neige, soit en intensifiant les processus de consolidation. Elle peut être aussi négative en augmentant localement le cumul de neige. Les facteurs thermiques (température de l'air, flux de chaleur du sol ou du soleil, vent chaud, rayonnement) influent directement sur la stabilité de la neige. Par exemple, l'arrivée d'un redoux après des chutes de neige provoque une humidification de la neige, qui peut induire une activité avalancheuse. Enfin, signalons que l'histoire du manteau neigeux a une grande importance sur sa stabilité à un moment. Ainsi des manteaux très hétérogènes (succession de couches de forte et faible résistances) sont plutôt plus propices au départ d'avalanche que des manteaux homogènes.

2.2. Mouvement d'une avalanche

Il est commode de distinguer deux classes limites d'écoulement [1] :

- *l'avalanche coulante* : c'est le déplacement d'une masse de neige homogène (en première approximation) le long du sol. L'écoulement est astreint à suivre le relief. L'échelle de hauteur d'écoulement est le mètre. La masse volumique est relativement importante, généralement comprise entre 150 et 600 kg/m³. Du point de vue mécanique, le comportement est essentiellement commandé par les interactions entre grains de neige ;
- *l'avalanche en aérosol* : c'est un écoulement rapide de neige sous la forme d'un nuage, qui résulte du mélange de l'air et des particules de glace. Cet aérosol est composé de grandes bouffées turbulentes, dont la trajectoire

n'est pas entièrement déterminée par le relief. L'échelle de hauteur est la dizaine de mètres.

Entre ces deux cas limites, il existe une gamme variée d'écoulements répondant (au cours de leur écoulement) à la fois à des critères distinctifs des avalanches coulantes et des aérosols ; on parle souvent *d'avalanche mixte*. Cette grande variété dans les caractéristiques des écoulements observés rend extrêmement difficile la mise en place d'une classification scientifique pertinente des avalanches. Dès lors, tout en gardant à l'esprit que la distinction de deux familles d'avalanches n'est qu'une vue de l'esprit, on supposera qu'une telle simplification est suffisante pour la description des avalanches et des processus impliqués.



Photographie 2. A gauche une avalanche coulante (site expérimental du col du Lautaret) et à droite avalanche en aérosol.

3. PROBLEMES POSES EN INGENIERIE

Il existe deux grandes classes de problème en ingénierie paravalanche. Le premier est relatif à la *prévision* du risque d'avalanche. Il est de prime importance dans la gestion quotidienne de nombreux aménagements tels que les domaines de ski ou les routes. Le second problème concerne la *prévention* du risque d'avalanche. Il s'agit alors de concilier des équipements durables (habitations, infrastructures diverses telles que ligne électrique, etc.) avec la menace potentielle que représentent les avalanches.

3.1. Prévision du risque d'avalanche : gestion temporelle

Dans la prévision du risque d'avalanche, il s'agit de déterminer la stabilité mécanique d'un manteau neigeux en fonction d'un certain nombre de paramètres (conditions nivo-météorologiques présentes, structure du manteau neigeux, caractéristiques du relief, etc.) et d'en déduire l'activité avalancheuse associée à courte échéance (de l'ordre de 24 h). L'analyse de la stabilité peut se faire à plusieurs échelles d'espace. A l'échelle régionale, la zone couverte est de plusieurs centaines de km² et, en France, c'est Météo-France qui a en charge l'organisation et la diffusion des bulletins de risque d'avalanche [1]. A une échelle locale, la zone couverte est variable alors de quelques hectares à quelques km². La prévision locale est en général mise en œuvre par des responsables d'aménagement soucieux d'intégrer au mieux le risque d'avalanche dans la gestion quotidienne de leur domaine. C'est le cas par exemple des responsables de stations de ski.

Dans les deux cas, la procédure opérationnelle suit les mêmes étapes. Il s'agit en tout premier lieu de recueillir l'information (conditions nivo-météorologiques, état du manteau neigeux). Celle-ci est collectée en différents points de l'espace couvert. Par exemple, dans le cas de la prévision régionale du risque d'avalanche, ce sont quelque 140 observateurs nivo-météorologues qui fournissent leurs mesures deux fois par jour à Météo-France. De plus en plus, des modèles de simulation numérique du manteau neigeux permettent de pallier l'absence de collecte d'information, notamment dans les domaines d'altitude. Ainsi, le modèle CROCUS développé par Météo-France permet de simuler l'évolution d'un manteau neigeux pour différentes expositions et tranches d'altitude. La seconde phase consiste à interpréter l'ensemble de ces informations en termes de stabilité du manteau neigeux. A l'heure actuelle, la démarche employée recouvre le plus souvent une analyse experte (où c'est l'expérience du prévisionniste qui sert à interpréter les données) et une analyse statistique (où l'on recherche dans l'histoire passée de la zone étudiée des relations nivo-météorologiques semblables et l'activité avalancheuse qui lui a été associée). Des logiciels tels que MEPRA

(développé par Météo-France) ou Nivolog (développé par la société suisse Météorisk) apportent une aide de plus en plus appréciable dans l'interprétation des données [1].

3.2. Prévention du risque d'avalanche : gestion spatiale

Dans la prévention du risque d'avalanche, on cherche à protéger un enjeu (en général un aménagement fixe tel qu'une habitation, mais aussi des lieux à flux de personnes comme les routes et les domaines skiables) sur le long terme contre les avalanches. La manière la plus naturelle de protéger un enjeu est de le placer hors de la trajectoire des avalanches. Ce souci naturel a conduit à établir des *plans de zonage* du risque d'avalanche, qui sont intégrés dans les *plans d'occupation des sols* (POS) des communes concernées. En France, depuis 1970, c'est l'Etat qui impose les règles d'établissement des plans de zonage. La première procédure appelée PZEA (plan des zones exposées au risque d'avalanche) a perduré jusqu'au début des années 1980, puis a été remplacée par une procédure plus générale appelée PER (plan d'exposition aux risques). La difficulté de mise en œuvre de cette réglementation a amené à l'actuelle procédure simplifiée dite PPR (plan de prévention des risques) en 1995. Naturellement, il n'est pas toujours possible de placer un enjeu hors d'une zone avalancheuse. Dans ce cas, il faut prévenir le risque soit en luttant contre le départ des avalanches, soit en protégeant directement l'enjeu contre les effets des avalanches. Il faut alors recourir à un ensemble de techniques disponibles regroupées sous le terme générique de *génie paravalanche* [1].

Dans les deux cas (zonage et génie paravalanche), il est important de connaître la nature, la fréquence, et l'intensité des phénomènes avalancheux du site étudié. Jusqu'à une époque récente, ce sont essentiellement l'expérience et l'analyse des événements historiques sur le site qui servaient à donner une représentation de l'aléa avalancheux. Le souci d'objectivité et le besoin d'une meilleure finesse de représentation a amené au développement de nombreux outils de calcul du risque d'avalanche.

4. LES OUTILS DE CALCUL

4.1. Les outils de prévision du risque d'avalanche

Les outils de prévision sont surtout des outils informatiques destinés à aider le prévisionniste dans son estimation du risque (temporel) d'avalanches. C'est ainsi que divers outils ont été développés pour suivre le processus de mesure, d'analyse, et d'estimation du risque d'avalanches. Certains logiciels courants en France ont déjà été cités au paragraphe précédent. Sans entrer dans les détails, on peut indiquer les produits existant actuellement et leurs principes. Le logiciel ASTRAL (Météo-France et Mathieu Gillet) est un logiciel, qui permet le recueil de données nivo-météorologiques et leur archivage dans des bases de données. Le risque d'avalanche à un moment donné est estimé en recherchant dans la base des événements passés les journées où les conditions nivo-météorologiques ont été similaires. Des modèles plus déterministes ont été développés par Météo-France : il s'agit d'une chaîne de trois programmes. Le premier, CROCUS, sert à simuler en différents endroits l'évolution du manteau neigeux. Pour cela, il a besoin de données météorologiques (vent, nébulosité, précipitations, etc.) qui lui sont fournies par le programme SAFRAN. Dernier maillon de cette chaîne, le logiciel expert MEPRA sert à analyser par tranche d'altitude et en fonction de l'altitude une estimation du risque de départ d'avalanche.

4.2. Les outils de calcul d'écoulement

4.2.1. Méthodes statistiques

Des méthodes de corrélation statistique ont été développées afin de connaître les distances extrêmes d'arrêt d'avalanche (extrême signifiant ici des avalanches de périodes de retour allant généralement de 100 à 300 ans). Ces méthodes reposent sur les corrélations existant entre des angles caractéristiques du profil de terrain. Parmi les plus communes, la méthode dite *norvégienne* définit un angle β entre le point de départ (présumé) des avalanches du site et le point du terrain naturel faisant un angle de 10° par rapport à l'horizontale [2, 3]. Généralement, pour adoucir les irrégularités

de terrain, le profil longitudinal naturel est remplacé par une courbe régulière (généralement une parabole). La position d'arrêt de l'avalanche est également référencée à l'aide d'un angle α lui aussi considéré à partir du point départ des avalanches (voir figure 1). Des formules de corrélation ont été recherchées entre α et β . Par exemple, sur la base de 113 événements exceptionnels, Lied et Toppe aboutirent à la corrélation linéaire suivante : $\alpha = 0,96\beta - 1,7^\circ$ (corrélation $r = 0,93$ et écart-type $1,4^\circ$). Des corrélations plus ou moins complexes et fines ont par la suite été calées pour diverses régions du monde, notamment en France [4]. Malheureusement, pour l'arc alpin, les profils de terrain sont bien plus complexes que ceux sur lesquels la méthode a été originellement testée. Le confinement, les changements d'orientation, et la forte irrégularité des profils rendent difficilement applicables de telles méthodes en France. De plus, ce type de modélisation ne renseigne (pour l'instant) pas sur d'autres variables d'intérêt (comme la vitesse) que la cote d'arrêt.

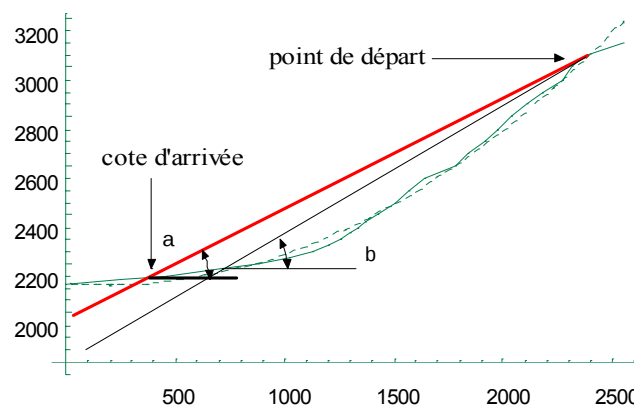


Figure 1. Définition des angles α et β dans la méthode norvégienne.

4.2.2. Méthodes déterministes

L'approche déterministe consiste à essayer de comprendre et quantifier les mécanismes impliqués dans les avalanches. Plusieurs échelles spatiales d'analyse sont possibles pour décrire un écoulement (cf. figure 2). La plus grande échelle, celle de l'écoulement, conduit aux modèles les plus simples, le plus souvent analytiques ou en tout cas avec une feuille de calcul d'un tableur. Les principales variables sont la

position du centre de gravité et sa vitesse. Le comportement mécanique est principalement décrit à travers la force de frottement F exercé par le fond sur l'écoulement. La plus fine actuellement, proche de la taille des grains mobilisés dans l'écoulement, amène à des problèmes numériques complexes nécessitant plusieurs heures ou jours de calculs. L'écoulement est calculé en chaque point de l'espace qu'il occupe, ce qui nécessite de connaître en ce point les vitesses et les contraintes qui s'exercent. Des modèles intermédiaires existent avec pour principal avantage une complexité moindre par rapport aux modèles numériques à petite échelle de résolution et une finesse accrue par rapport aux modèles globaux. Ces modèles sont en général obtenus par intégration des équations locales du mouvement selon la hauteur, ce qui conduit à un jeu d'équations moyennées du mouvement (démarche similaire à ce qui est fait en hydraulique avec les équations de Saint Venant).

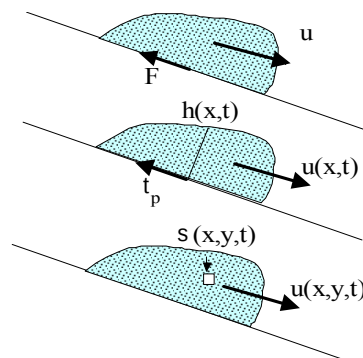


Figure 2. Différents types d'échelle d'analyse.

Nous nous intéresserons ici principalement aux modèles globaux. Il en existe deux catégories selon le type d'avalanche (coulante ou en aérosol). Pour les avalanches coulantes, l'un des modèles les plus populaires porte le nom de Voellmy, qui a été l'un de ses inventeurs. Ce modèle a connu depuis de nombreuses évolutions pour en améliorer les performances. L'hypothèse à la base du modèle est de considérer une avalanche coulante comme un corps rigide soumis à une force de frottement de la forme :

$$F = mg \frac{u^2}{\xi h} + \mu m g \cos \theta \quad (1)$$

où m représente la masse de l'avalanche, h sa hauteur, μ un coefficient de frottement traduisant en quelque sorte une viscosité de l'écoulement, ξ un terme de frottement dynamique représentant l'action du fond sur l'écoulement [5, 6]. Ces deux paramètres ont été calés sur plusieurs séries d'événements. On retient en général que le paramètre μ ne dépend que de la taille ou de la période de retour de l'avalanche. Pour de grosses avalanches (plus centaines de milliers de m^3 ou des périodes de retour de l'ordre de 300 ans), il est fréquent de prendre $\mu = 0,155$. Pour de petites avalanches (quelques milliers de m^3 ou des périodes de retour de l'ordre de quelques années), on prend $\mu \approx 0,3 - 0,35$. De même le coefficient ξ traduit plutôt l'influence du site. Lorsque la trajectoire de l'avalanche se fait sur de grandes pentes ouvertes, avec une rugosité importante (végétation, bloc), la valeur de ξ est choisie proche de 400 m/s^2 . Inversement, pour des trajectoires confinées dans des couloirs peu sinueux, ξ peut être pris égal à 1000 m/s^2 ou plus. En régime permanent, la vitesse se déduit facilement de l'équation de la quantité de mouvement ; on trouve :

$$u = \sqrt{\xi h \cos \theta (\tan \theta - \mu)} \quad (2)$$

Selon cette formule, deux régimes d'écoulement existent. Pour $\tan \theta > \mu$, une solution réelle existe pour l'équation (2) et un régime permanent peut s'établir. $\tan \theta < \mu$, il n'y a pas de solution réelle : la force de frottement devient excédentaire par rapport à la force motrice apportée par la gravité. On considère alors que l'écoulement entre dans sa phase d'arrêt. Le point P du profil pour lequel $\tan \theta = \mu$ est appelé le point caractéristique ; il joue un rôle important dans la description de la dynamique en séparant zones d'écoulement et d'arrêt de l'avalanche. Notons toutefois que, dans des massifs au relief complexe comme les Alpes, il y a souvent plusieurs points caractéristiques pour un même profil. Pour l'heure, c'est encore du ressort de l'expert que de déterminer le bon point caractéristique du profil. Dans la zone d'arrêt,

on tire de l'équation de quantité de mouvement que la vitesse diminue régulièrement selon l'expression :

$$\frac{1}{2} \frac{du^2}{dx} + u^2 \frac{g}{\xi h} = g \cos \theta (\tan \theta - \mu) \quad (3)$$

La distance d'arrêt x_a s'en déduit facilement en admettant qu'en un point $x = 0$, la vitesse de l'avalanche est u_p (notons qu'en pratique le point origine $x = 0$ est pris en P, en revanche la vitesse en P, nulle selon l'équation (2), est déterminée à l'aide d'une procédure spécifique non explicitée ici, voir [5]). On trouve ainsi :

$$x_a = \frac{\xi h}{2g} \ln \left(1 + \frac{u_p^2}{\xi h \cos \theta (\mu - \tan \theta)} \right) \quad (4)$$

Ce genre de modèle permet de calculer assez facilement la distance d'arrêt d'une avalanche, les vitesses maximales atteintes par l'avalanche en divers tronçons, et éventuellement la pression d'impact calculée selon l'expression (valable uniquement pour un obstacle de petite dimension par rapport à l'avalanche) : $p = c \rho v^2$, avec ρ la masse volumique de l'avalanche, c un facteur de forme pris entre 0,5 et 1 selon la géométrie de l'obstacle.

Pour les avalanches en aérosol, un modèle global a été développé par Béghin sur la base de l'analogie avec des courants de turbidité sous-marins [7, 8]. La principale difficulté par rapport au modèle d'avalanche coulante est que le volume d'un aérosol croît au cours du temps. Il est donc nécessaire d'introduire une nouvelle équation traduisant le bilan de matière. Nous présentons ici une version simplifiée du modèle. Le corps de l'avalanche est assimilé à un écoulement turbulent soumis uniquement à la pesanteur (on néglige donc les frottements au sol et avec l'air ambiant) :

$$\frac{d(\rho V u)}{dt} = \Delta \rho \ g \sin \theta \ V \quad (5)$$

où V désigne le volume de l'avalanche, ρ sa masse volumique, $\Delta\rho = \rho - \rho_a$ la différence de masse volumique avec le fluide ambiant ρ_a . On suppose que la section longitudinale de l'écoulement a la forme d'une demie ellipse respectivement de demis petit axe et grand axe H et L . On admet également que le rapport de la longueur sur la hauteur d'écoulement $k = H/L$ est constant tout au long du mouvement. Le volume par unité de largeur s'écrit sous la forme : $V = HL/2$. Par ailleurs l'équation de conservation de la masse s'écrit en tenant compte de l'incorporation d'air :

$$\frac{dV}{dt} = \alpha(\theta)\sqrt{HL} \quad u + r \quad (6)$$

$\alpha(\theta)$ est un paramètre d'entraînement de l'air, qui est supposé ne dépendre que de la pente, r représente la quantité de neige reprise au sol par l'aérosol. Dans les cas pratiques, le système d'équations (5-6) est résolu numériquement tronçon par tronçon. Il existe des solutions analytiques dans certains cas, notamment lorsque l'on considère le cas d'un tronçon de pente uniforme et sans reprise de neige ($r = 0$). Dans ce cas, on trouve que la hauteur d'écoulement croît linéairement avec la distance :

$$H = \alpha\sqrt{k} x + H_0 \quad (7)$$

où l'on a considéré comme conditions initiales pour la hauteur, la longueur, la vitesse, et la masse volumique respectivement : H_0 , L_0 , u_0 , et ρ_0 . On notera qu'en l'absence de reprise, la variation de quantité de mouvement (force d'accélération) est constante et vaut : $(\rho_0 - \rho_a)V_0 g \sin \theta$. Comme le volume continue de croître au fur et à mesure de son avancée, cela signifie que sur le long terme, la vitesse doit diminuer. En effet, compte tenu du fait que la masse volumique varie comme : $\rho V = \rho_0 V_0 + \rho_a (V - V_0)$, on trouve que la vitesse du centre de gravité de l'aérosol vérifie :

$$u^2 = \frac{4V_0(3u_0^2V_0\rho_0^2 + g x \sin \theta \Delta\rho_0(x\alpha(3\sqrt{k} + x\alpha) + 6V_0\rho_0))}{3(\alpha x(2\sqrt{k} + \alpha x) + 2\rho_0V_0)^2} \quad (8)$$

Un développement asymptotique montre en effet que la vitesse diminue comme :

$$u \propto \sqrt{\frac{4}{3} \frac{\Delta\rho_0}{\rho_a} \frac{\sin\theta}{\alpha^2} \frac{V_0 g}{x}} \quad (9)$$

Cette phase de décélération peut être accompagnée d'une phase d'accélération selon les conditions initiales (il faut pour cela que $u_0 < V_0 g \sin\theta \Delta\rho_0 / (\alpha \rho_a \sqrt{k} H_0)$). Les différents paramètres du modèle (α et k) ont été calés à partir des expériences à échelle réduite en laboratoire sur des courants de turbidité. Les tendances données par le modèle (linéarité de H et décroissance de u avec x) ont par ailleurs été vérifiées expérimentalement [7, 8].

4.2.3. Simulation sur modèle réduit

Une troisième approche pour calculer des caractéristiques des écoulements est de les simuler à échelle réduite en laboratoire. Contrairement à l'hydrodynamique ou à l'hydraulique, où à la fois les fluides (eau, air) et les critères de similitude sont simples, la neige est un matériau complexe et nous ne connaissons pas encore sa loi de comportement. A défaut de réaliser des expériences en similitude exacte, il est en revanche possible de procéder à des essais à échelle réduite en exploitant des analogies. Dans le cas des aérosols, c'est l'analogie avec les courants de turbidité qui a été exploitée. Les simulations en laboratoire consistent à étudier des écoulements de suspensions (par exemple des suspensions salines ou de polystyrène) sur une pente inclinée dans une cuve d'eau claire ou plus récemment des suspensions de particules fines (kaolinite) dans de l'air [8]. Concernant les avalanches coulantes, c'est essentiellement la similarité avec les écoulements granulaires secs (sable, billes, balles de ping-pong) qui a été jusqu'à présent exploitée [9]. Aucune comparaison avec des phénomènes naturels n'a été proposée à notre connaissance, mais de tels essais ont servi, par exemple, à mieux maîtriser qualitativement l'effet d'une digue sur un écoulement.

4.3. Calcul des volumes de neige mobilisé

Le volume de neige mobilisé par une avalanche ou bien l'épaisseur de la couche de neige déclenchée est une donnée nécessaire à la plupart des modèles numériques. Il s'estime en général de manière statistique. Plusieurs méthodes sont possibles selon les données disponibles pour le site étudié. Lorsque une chronique continue et suffisamment longue d'événements passés a permis d'avoir une série de volumes déposés par des avalanches sur un site donné, il est possible d'aboutir à une distribution empirique du volume déposé en fonction de la période de retour. Au moins deux méthodes classiques (issues de l'hydrologie) existent. La première consiste à ne considérer que les maxima annuels des volumes déposés V_i pendant N années successives. On classe ensuite ces données par ordre décroissant et on leur attribue une période de retour empirique de la forme, par exemple de la forme : $(N + 0,4)/(i - 0,3)$. Il est possible de caler ensuite les points ainsi obtenus par des lois de distribution. En général une loi de type *Gumbel* ou bien exponentiel simple est adéquate. Une seconde méthode, dite du *renouvellement*, consiste à se donner un seuil de volume et à ne considérer dans la chronique que les volumes supérieurs à ce seuil. Ensuite la méthode est en tout point similaire à la méthode des maxima annuels. Lorsque les données de volume déposé n'existent pas ou ne constituent pas une série suffisamment longue, il est possible de les estimer par des données de cumul de neige d'un poste nivo-météorologique à proximité. On reporte à la figure 1 un exemple de traitement pour des cumuls de neige journaliers.

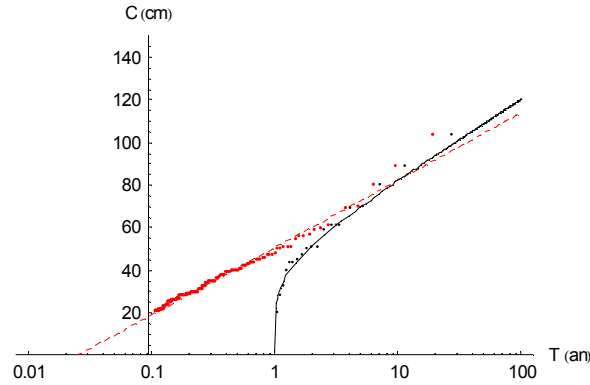


Figure 3. Distribution des cumuls de neige journaliers aux Arcs (2040 m) en fonction de la période de retour. Les points et la courbe continue représentent respectivement les données traitées par la méthode des maxi annuels et la loi de Gumbel calée par la méthode des moments. La courbe discontinue représente la loi exponentielle simple calée à l'aide de la méthode du renouvellement.

En général, compte tenu de la taille réduite des chroniques, de leurs lacunes, et des erreurs de mesure, il est recommandé d'employer plusieurs méthodes et de critiquer les données et résultats avant de retenir une loi de distribution pour un cumul de neige. Notons que, comme les précipitations de pluie, les précipitations de neige (en cm) peuvent souvent être représentées à l'aide d'une loi de distribution de la forme :

$$C = d^b \left(a - c \ln \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right) \right) \quad (10)$$

où a , b , et c sont trois constantes positives à caler, T la période de retour et d la durée du cumul considéré. En hydrologie, $c d^b$ représente le *gradex* des précipitations de durée d (en h). Pour déduire du cumul de neige des volumes de neige mobilisés ou bien des hauteurs de neige déclenchées, il est nécessaire de disposer d'opérations de transformation. Celles-ci sont en général empiriques. Par exemple, en génie paravalanche, on considère le plus souvent que la hauteur de neige déclenchée h_0 (en cm) se calcule comme [5] :

$$h_0 = \frac{0,291 \ C^*}{\sin \theta - 0,202 \cos \theta} + (0,05 \ z - 100) \ H(0,01 \ z - 20) + \delta \quad (11)$$

où C^* , θ , z , H , et δ représentent respectivement le cumul de neige sur 3 jours, la pente moyenne de la zone de départ, l'altitude de la zone de départ, la fonction de Heavyside, et un facteur de correction en cas d'influence prépondérante du vent. En résumé dans les calculs de volume ou de hauteur de neige, on recourt en général à des méthodes statistiques tirées de l'hydrologie, puis souvent des règles empiriques de transformation. Dans la mesure du possible, il convient de toujours bien critiquer les données utilisées et la pertinence des résultats auxquels on aboutit.

5. LES STRATEGIES DE DEFENSE PARAVALANCHE

5.1 Les types de stratégie de défense

Face à un risque d'avalanche menaçant un enjeu, il existe plusieurs techniques possibles de protection [1]. On classe les stratégies paravalanches en quatre familles distinctes. Les deux critères de classification sont : la durée de la mise en œuvre de la protection (permanente/ temporaire) et le point d'intervention (active/ passive). La *défense permanente* met en œuvre des moyens de protections sans qu'une intervention humaine soit nécessaire pour les enclencher. Elle regroupe en général des ouvrages de génie civil construits à demeure. La *défense temporaire* regroupe les méthodes de protection, qui ne sont mises en œuvre que sur un laps de temps limité lorsqu'il y a une réelle possibilité d'avalanche du point de vue nivo-météorologique. Le déclenchement préventif à l'explosif dans les domaines skiables en est un exemple. On parle de *défense active* lorsqu'on emploie des méthodes qui tentent de maîtriser, de modifier ou de détecter les conditions de départ de l'avalanche ; en d'autres termes le point d'intervention est la zone de départ des avalanches du site. Inversement, pour la *défense passive*, on cherche à maîtriser, à modifier ou à détecter l'écoulement avalancheux soit en tentant de l'arrêter, de le dévier, soit en s'auto-protégeant, etc. Certaines des techniques en vigueur font l'objet de normes françaises (NF-P95-3xx).

Défense	Permanente	Temporaire
<i>Passive</i>	– Déviation : galerie, tremplin, tourne, digue, étrave – Freinage : tas, dent, obstacle ajouré – Arrêt : mur, digue (stockage : plage de dépôt) – Adaptation, renforcement des constructions au site/phénomène ; esquive – Avertissement, alerte : signalisation, D.R.A. (détecteur routier d'avalanche)	– Réglementation : interdiction, évacuation, consigne
Active	– Modification de la rugosité du sol : banquette (étroite), fauchage, drainage – Reboisement : plantation – Fixation et soutien du manteau neigeux : râtelier, claie, filet – Utilisation de l'action du vent : barrière à neige, virevent, toit-buse	– Damage – Déclenchement artificiel avec les skis – à l'explosif : à la main, hélicoptère, avalancheur, CATEX, (canon) – au gaz : GAZEX, AVALHEX

Tableau 1. Les différentes stratégies de protection paravalanche en France.

5.2 Les techniques de défense active

5.2.1. Les techniques de défense active temporaire

Elles sont largement employées dans la gestion des domaines skiables compte tenu de leur souplesse et en l'absence d'enjeux matériels et humains importants. Outre des méthodes « douces » comme celle du damage, ces techniques regroupent l'ensemble des actions de déclenchement artificiel préventif des avalanches. Ceci consiste à nettoyer de manière systématique les zones de départ d'avalanches dès qu'un risque d'avalanche existe. Ce type de défense repose le plus souvent sur l'emploi d'explosifs qui est sévèrement réglementé et nécessite un personnel qualifié (artificiers). Chaque intervention en France doit avoir lieu dans le cadre d'un *plan d'intervention pour le déclenchement des avalanches* (PIDA). C'est un document proposé par le maire, visé par le préfet qui précise les secteurs concernés par les tirs préventifs, les itinéraires à suivre, les zones interdites, les intervenants, la procédure utilisée, et les consignes de tir. Les divers moyens de déclenchement artificiel sont :

- le déclenchement manuel : la charge est positionnée à la main dans la pente par l'intermédiaire d'une cordelette. L'explosion a lieu sur le manteau neigeux et est d'efficacité moyenne. Son coût de revient est très faible mais une telle méthode n'est pas tout le temps possible (mauvaises conditions nivo-météorologiques ou accès difficiles). La sécurité du pisteur exige de nombreuses précautions (itinéraire, lieu de tir, procédures, ...) ;
- l'avalancheur : il s'agit d'un lanceur pneumatique de flèches explosives. La portée maximale est d'environ 1900 m et 550 mètres de dénivelée. La flèche explosive est un tube d'environ 1,8 mètre de long contenant un mélange liquide explosif de 2,2 kg (inerte au bout d'une dizaine d'heure de non-utilisation) et explose en atteignant le manteau neigeux ;
- CATEX : il s'agit d'un câble tournant soutenu par des pylônes, qui permet de positionner quelques kilogrammes d'explosif juste au-dessus du manteau neigeux et dans plusieurs couloirs proches (de 5 à 20). Très largement employé en France depuis bientôt vingt ans (plus de 160 installations), c'est un investissement lourd (500 000 FHT par kilomètre) surtout utilisé pour la protection des pistes de ski et de certaines routes ;
- GAZEX : c'est un exploseur à gaz apparu en 1988. Il est constitué d'un tube ouvrant vers l'extérieur, où est enflammé un mélange détonant de propane et d'oxygène. L'onde de pression créée peut déclencher une accumulation instable. Il existe à la fin 1999 plus de 380 tubes exploseurs (dragons) en France. C'est un dispositif d'emploi peu onéreux, très souple et discret (si ce n'est le bruit) mais demandant un investissement conséquent (~400 000 FHT par unité, suivant le volume) ;

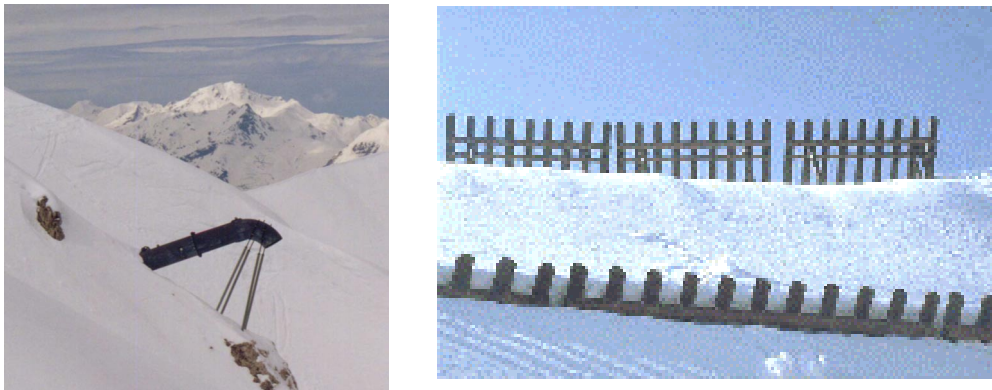


Figure 4 : exploseur de type Gazex (à droite) et râtelier (à gauche)

- AVALHEX : c'est un nouvel exploseur à gaz, qui consiste à gonfler un ballon rempli d'air et d'hydrogène au-dessus du manteau neigeux, puis de le faire exploser. Il est en cours de lancement (en 2000) ;
- hélicoptère : son utilisation s'est beaucoup développée. Son principal handicap est qu'il ne peut pas intervenir par tout temps et qu'il n'est autorisé qu'à titre expérimental dans des conditions techniques strictes.

5.2.2. Les techniques de défense active permanente

Ces techniques, qui ont été largement employées durant les dernières décennies, sont moins en vogue, notamment car l'investissement nécessaire est considérable, puisqu'il faut traiter des surfaces étendues (plusieurs hectares) dans des pentes raides (parfois supérieures à 40°) et d'accès difficile (l'hélicoptère est aujourd'hui employé). Elles ne peuvent se justifier que vis-à-vis de l'importance de l'objectif à protéger. La pérennité de la sécurité offerte par ces ouvrages peut également poser problème en l'absence d'entretien. Plusieurs procédés sont en usage :

- Modification de la surface du sol :
 - terrassement : on aménage des banquettes étroites (de largeur 1 m), qui freinent la reptation de la neige et son glissement au sol. Leur effet n'est efficace que sur les avalanches de fond (c'est-à-dire quand tout le manteau neigeux jusqu'au sol est mobilisé). Elles ne

méritent d'être réalisées qu'accompagnées d'actions parallèles de reboisement, ce qui limite l'altitude d'utilisation au-dessous de 2000 m (voire moins). Elles doivent par ailleurs être entretenues annuellement pour garder leur efficacité ;

- revégétalisation : ce sont des actions à long terme (20 à 50 ans au moins) de reboisement (diverses essences selon la région, l'altitude, et le sol).
- Soutien du manteau neigeux :
 - râtelier : c'est un ouvrage en métal ou en bois composé d'un tablier à traverses (non jointives) perpendiculaires au sol et hautes de plusieurs mètres. On place les râteliers en lignes continues le long d'une courbe de niveau pour soutenir le manteau neigeux. En cas d'épaisseur importante du manteau, les râteliers peuvent être saturés et devenir inefficaces. De même lors de chutes importantes de neige poudreuse, la neige sans cohésion peut s'écouler au travers des ouvrages, qui se purgent alors brusquement.
 - claie : c'est le même type d'ouvrage que le râtelier, mais les traverses sont horizontales. La claie est surtout utilisée en Suisse et en Italie ;
 - filet : ce sont des nappes souples câblées avec des mailles d'une vingtaine de centimètres (câble en acier), qui jouent le même rôle que des ouvrages rigides, mais dont l'ancrage dans le sol est plus aisé.
- Utilisation de l'action du vent :
 - barrière à neige : il s'agit d'une barrière métallique ou en bois, verticale à transverses horizontales de 4 à 5 mètres de hauteur. Elle comporte une garde au sol (comprise entre 15 et 20% de la hauteur

de la barrière), qui sert à accélérer le vent au sol et donc à éviter un ensevelissement de l'ouvrage et permet d'augmenter le volume du dépôt. On l'utilise pour supprimer les accumulations et les congères : en perturbant l'écoulement d'air, la barrière placée face au vent, crée un sillage (ralentissement du vent) qui favorise un dépôt de neige derrière elle ; elle permet d'atténuer voire de supprimer ainsi des corniches. Son efficacité est amoindrie voire nulle si le vent souffle dans une mauvaise direction. Il existe maintenant des barrières amovibles auto-orientables pour atténuer cet inconvénient ;

- vire-vent : il s'agit d'un tablier vertical en bois de forme trapézoïdale haut de plusieurs mètres. La plus petite des bases est placée à proximité du sol. Sa forme perturbe l'écoulement d'air et donne naissance à des tourbillons qui érodent localement, souvent jusqu'au sol, le manteau neigeux. Quelquefois, un réseau linéaire de vire-vents peut être également utilisé pour découper en plusieurs panneaux un secteur de la zone de départ et les rendre indépendants ;
- toit-buse : c'est un panneau composé de planches de bois inclinées à plus ou moins 45°. Il agit comme un goulot d'étranglement, accélère l'écoulement d'air et force la neige transportée par le vent à se déposer plus loin..

5.3 Les techniques de défense passive

La défense passive temporaire regroupe principalement des mesures administratives d'interdiction de circulation, d'évacuation des équipements menacés. Ces mesures relèvent en général d'un règlement : l'autorité prend la décision, dont elle est responsable, elle doit prévoir des plans de secours ou d'intervention.. Les mesures d'interdiction ou d'évacuation sont prises par le maire (Code des communes article L 131-2). Les techniques de défense passive permanente sont historiquement les plus

vieilles. Malgré leur âge, elles sont toujours « à la mode » d'une part car le catalogue des techniques disponibles est bien fourni et d'autre part que beaucoup de maîtres d'ouvrage sont actuellement enclins à ce type de stratégie. Elles sont majoritairement constituées d'ouvrage de génie civil. Outre l'auto-protection d'une habitation par renforcement du bâti, on distingue plusieurs parades :

- Ouvrages de déviation :
 - galerie, tunnel : l'ouvrage forme un tremplin au-dessus de la voie d'accès. Sa longueur doit être supérieure à la celle de la zone initialement balayée par l'avalanche. C'est un investissement extrêmement onéreux : il faut compter au moins 150 000 F par mètre linéaire d'ouvrage ;
 - tourne : il s'agit d'une digue de déviation sur le côté, constituée d'une levée de terre ou d'un mur en maçonnerie et qui détourne l'écoulement dense. La hauteur doit être importante, le mur amont doit être le plus proche de la normale au sol possible ;
 - étrave : c'est un ouvrage massif en forme de coin, de principe similaire à la tourne, et placé juste à l'amont de l'objectif (pylône, maison...). Il dévie l'écoulement en deux parties.
- Ouvrage de freinage et d'arrêt :
 - tas freineur : ce sont des buttes en terre, en maçonnerie ou en gabion qui, disposées en réseau, servent à freiner l'avalanche et à tenter de provoquer son arrêt dans une zone de stockage ; il faut donc prévoir à l'aval une plage suffisante pour le dépôt de l'avalanche. Si une première avalanche comble l'aire de stockage, une deuxième peut passer au-dessus et endommager alors l'objectif à protéger ;
 - dent freineuse : il s'agit d'un ouvrage en béton armé, haut de plusieurs mètres et de principe similaire au tas. Elle accepte au cours

de l'avalanche une pression bien plus importante. Le coût est en revanche bien plus élevé ;

- digue d'arrêt : il s'agit d'un mur en pierre ou en terre, haut de plusieurs mètres qui tente d'arrêter la fin de l'écoulement. Le coût n'est pas très élevé s'il s'agit de terre compactée. La même réserve doit être apportée à propos d'une saturation possible de la plage de dépôt. Ce type d'aménagement est complémentaire d'autres.

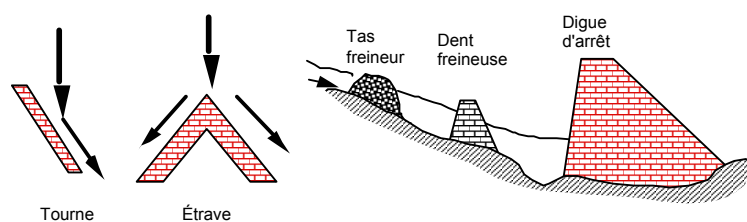


Figure 5. Les principales techniques de défense passive permanente.

A signaler aussi l'emploi parfois de détecteurs routiers d'avalanche (DRA), qui commandent des feux rouges, bloquant ainsi une route en cas d'avalanche

L'EXPERTISE DU RISQUE D'AVALANCHE

6.1 Principe et méthodologie d'étude

Jusqu'à une époque en France, les populations montagnardes et les aménageurs se sont satisfaits de leurs propres analyses du risque d'avalanche et des moyens de protection à mettre en œuvre. Si cette automédication continue encore à subsister, elle est devenue de moins en moins performante au fur et à mesure du progrès des connaissances et techniques et sous le poids de la réglementation. C'est ainsi en France qu'après la catastrophe de Val d'Isère (1970) sont apparus les premiers experts, dont le métier à part entière est consacré aux avalanches. Le visage de l'expertise a considérablement changé en 30 ans. Quoique l'histoire de l'expertise soit d'une

grande importance pour comprendre les relations parfois complexes entre l'expert et le maître d'ouvrage, nous ne nous intéresserons ici qu'à la situation présente. Nous contenterons d'indiquer les grandes étapes du raisonnement suivi en expertise. Les types d'expertise sont extrêmement variés : nature de l'enjeu, finesse demandée, échelle spatiale d'analyse, etc. Mais, schématiquement, le processus de progression est identique que l'on traite la protection d'une remontée mécanique ou celle d'un réseau routier s'étendant sur plusieurs kilomètres. La première phase de l'expertise vise à établir un tableau général du risque d'avalanche comprenant un diagnostic de l'aléa et une analyse des désordres possibles au niveau des enjeux. Ce dernier point, l'examen de la vulnérabilité d'un enjeu face à des avalanches, est capital puisque c'est une base de discussion entre les acteurs d'un projet d'aménagement pour déterminer l'aléa de référence contre lequel ils souhaitent se protéger. Une fois cet aléa connu, l'expert peut passer à une seconde phase, qui est *grosso modo* celle de l'élaboration d'une stratégie de protection. Quand cela est possible, il examine plusieurs stratégies de protection qui répondent à l'objectif de protection assigné et les compare selon différents critères au premier chef desquels le coût en investissement et entretien, la commodité, et le risque résiduel. Une fois que le maître d'ouvrage a opté pour la stratégie de défense qui lui convient le mieux, l'expert peut achever son expertise en choisissant les techniques de protection nécessaires à la protection et en les dimensionnant au regard de l'avalanche de référence.

6.2 Le diagnostic du risque

Le diagnostic du risque d'avalanche sur un site donné a pour objectif une description de l'aléa avalancheux avec pour principaux critères : la nature du phénomène, son intensité, et sa fréquence. A cette fin, on procède en général à trois analyses complémentaires :

- analyse spatiale : il s'agit de dresser un bilan des zones soumises à une activité avalancheuse et d'arriver à un découpage du site en différentes zones en les articulant entre elles (départ, transit, dépôt). L'expert se fonde

principalement sur l'analyse des renseignements existants (notamment l'inventaire des avalanches reportées dans la *carte de localisation probable des avalanches* éditée par le Cemagref, des plans tels que celui du PIDA, etc.), des photographies aériennes stéréoscopiques, des témoignages, et des observations de terrain ;

- analyse temporelle : il s'agit de déterminer la relation qui existe entre la magnitude d'un événement et sa fréquence. C'est généralement sur des données nivo-météorologiques du site que s'effectue cette analyse (voir § 4.3), mais également sur des chroniques d'événements passés quand elles sont disponibles. A ce niveau, il doit être possible d'arriver à une estimation de la relation entre volume de neige mobilisable par une avalanche et la période de retour de celle-ci ;
- analyse fonctionnelle : il s'agit de caractériser la manière dont s'écoulent les avalanches et les effets qu'elles sont susceptibles d'exercer sur l'enjeu étudié. A cet effet, l'expert a souvent recours à des modèles de calcul plus ou moins sophistiqués (cf. § 4).

Au terme des analyses, l'expert est à même de broser un tableau à peu près complet de l'aléa avalancheux sur le site. La principale difficulté consiste souvent à assurer une bonne cohérence entre ces analyses. Il est important ensuite d'examiner de quelle manière l'enjeu est menacé par des avalanches. La réponse à cette question peut être rapide s'il s'agit de savoir si un enjeu est soumis à un risque ou de déterminer quelle est la fréquence moyenne d'occurrence d'un événement. Elle peut être plus délicate à exprimer s'il s'agit de préciser les désordres occasionnés. Dans ce cas, des diagrammes et des cartes d'extension et de désordres en fonction des fréquences de retour sont souvent utiles pour faciliter la compréhension du maître d'ouvrage.

6.3 Concertation sur l'objectif de protection et une stratégie de protection

Une fois le diagnostic de l'aléa et l'analyse de la vulnérabilité soumis à l'appréciation du maître d'ouvrage, il faut que ce dernier choisisse un scénario de l'aléa de référence, similaire à ce qu'est la crue de projet pour un aménagement hydraulique, c'est-à-dire le plus gros événement contre lequel le maître d'ouvrage souhaite se prémunir le plus complètement possible. La nature du phénomène (aérosol, avalanche coulante) et sa période de retour sont les deux clés principales du scénario. Plusieurs points permettent au maître d'ouvrage d'asseoir sa décision. En général, la période de retour doit être choisie supérieure à la durée de vie ou d'amortissement de l'aménagement. Actuellement, un usage implicite en France est de prendre la fréquence centennale pour les équipements lourds. Une analyse économique sur le coût de la protection au regard du coût des dommages probables peut également éclairer la décision lorsque l'enjeu n'est que matériel. Enfin, soulignons que le maître d'ouvrage a toujours grand intérêt à faire participer les différents acteurs du projet à la décision (élus, riverains, services de l'Etat, associations diverses, etc.).

Une fois l'aléa de référence choisi, l'expert peut examiner les stratégies de défense convenables compte tenu de l'objectif de protection assigné, des caractéristiques du site, et de la réglementation en vigueur. Il est de plus en plus fréquent que l'expert soit amené à étudier plusieurs stratégies. Outre les quatre stratégies définies précédemment (§ 5), il est en effet possible de combiner les stratégies entre elles, notamment lorsqu'il n'est pas possible d'atteindre l'objectif de protection à l'aide d'une seule stratégie. Pour comparer les solutions techniques entre elles, il est utile de les évaluer à l'aide de différents critères tels que : l'investissement, le coût d'entretien, la commodité d'usage, le caractère évolutif, l'impact paysager, et le risque résiduel. Par risque résiduel, nous entendons le risque qui subsiste au niveau de l'enjeu après la construction de la protection. Le risque est pris alors au sens large : il inclut à la fois le risque d'avalanche mais également les autres risques possibles sur le site (chutes de blocs, risques torrentiels). Il est notamment important de vérifier que la mise en place d'une protection pour réduire le risque d'avalanche n'augmente pas le risque par ailleurs.

C'est le cas par exemple des digues de déviation qui peuvent également avoir une influence sur les flux torrentiels. De plus, l'estimation du risque résiduel permet d'une part de préciser les limites de la protection projetée (notamment pour fixer une conduite à tenir : plans d'évacuation, de secours mais aussi schémas d'aménagement après mise en place de la protection) et d'autre part d'affiner l'estimation de la rentabilité économique de la protection envisagée.

Après que le maître d'ouvrage a opté pour une stratégie de protection, l'expert peut construire une solution technique remplissant l'objectif de sécurité assigné. Il a à sa disposition tout un catalogue de techniques et de prescriptions (cf. § 5) dans lequel il peut tirer les moyens les plus appropriés au cas étudié.

BIBLIOGRAPHIE

1. Ancey, C., ed. *Guide Neige et Avalanches : Connaissances, Pratiques, Sécurité*. 1998, Édisud : Aix-en-Provence. 320.
2. Lied, K. and S. Bakkehøi, *Empirical calculations of snow avalanche run-out distances based on topographic parameters*. Journal of Glaciology, 1980. **26** : p. 165-177.
3. McClung, D.M. and A.I. Mears, *Extreme value prediction of snow avalanche runout*. Cold Regions Science and Technology, 1991. **19** : p. 163-175.
4. Ghali, A., *Estimation de la distance maximale d'arrêt des avalanches*. Neige et Avalanches, 1994. **68** : p. 19-22.
5. Salm, B., A. Burkard, and H. Gubler, *Berechnung von Fliesslawinen, eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen*. 1990, Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Davos).
6. Salm, B., *Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches*. Annals of Glaciology, 1993. **18** : p. 221-226.
7. Beghin, P., E.J. Hopfinger, and R.E. Britter, *Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries*. Journal of Fluid Mechanics, 1981. **107** : p. 407-422.
8. Beghin, P. and X. Olagne, *Experimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanches*. Cold Regions Science and Technology, 1991. **19** : p. 317-326.
9. Chu, T., *Experiments on granular flows to predict avalanche runup*. Canadian Geotechnical Journal, 1995. **32** : p. 285-295.